第 41 卷　第 3 期　　天 文 学 进 展　　Vol. 41,　No. 3
2023 年 9 月　　PROGRESS IN ASTRONOMY　　Sept., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.03.08

热层大气密度对太阳辐射 27 d 短期震荡的响应规律

汪宏波[1,2]，张明江[1,2]，熊建宁[1,2]

(1. 中国科学院 紫金山天文台，南京 210023；2. 中国科学院 空间目标与碎片观测重点实验室，南京 210023)

摘要： 在近地空间目标和碎片的定轨预报任务中，需要准确计算热层中性大气密度。太阳辐射约 27 d 周期的短期震荡是影响大气密度的一种重要的空间环境因素，它会引起大气密度在全球尺度上的涨落。选择 CHAMP、GRACE-A 和 SWARM-C 这 3 颗极轨卫星星载加速仪数据推导出的大气密度资料，提取其中的 27 d 短期变化信号，与太阳极紫外辐射 (S_{10} 指数) 的 27 d 短期变化进行多元回归分析，研究热层大气密度对太阳辐射短期变化的响应规律，及其在不同高度、辐射水平、昼夜半球和纬度等方面的差异。结果表明：太阳辐射短期变化对大气密度的影响与高度负相关 (主要因素)、与辐射水平正相关 (次要因素)；对白天半球的影响是夜间半球的约 2 倍；在白天半球，辐射影响随着纬度增大而减弱，夜间半球恰好相反。将以上观测结果与 NRLMSISE00 模型模拟结果对比，发现模型低估了太阳辐射短期变化对大气密度影响的 (50%～60%)，且低估了高度差异，但高估了辐射水平差异。利用 SOHO 卫星对太阳 26～34 nm 波长极紫外辐射 1 h 分辨率的测量值，研究了大气密度对辐射的响应延迟时间，约为 18 h (0.75 d)。研究结果对于优化大气模型建模、修正大气密度具有借鉴价值。

关　键　词： 空间天气；热层大气密度；太阳极紫外辐射；27 d 短期变化

中图分类号： P41　　　**文献标识码：** A

1 引　言

对于近地空间目标和碎片的定轨预报任务，热层中性大气密度是一个重要的输入参数，会随着日地空间环境、轨道位置等很多因素变化。其中，太阳活动是影响大气密度变化的最主要能量源，它的 11 a 基本周期和 27 d 短周期震荡都驱动着大气密度呈现出对应的周期变化。Jacchia 和 Briggs[1] 较早地发现 1958 β2 的轨道加速度存在 30 d 左右的周期变化，并猜

收稿日期： 2022-09-27；　**修回日期：** 2022-11-02

资助项目： 国家自然科学基金天文联合基金 (U1931136)。

通讯作者： 汪宏波，whb@pmo.ac.cn

想这与太阳辐射的 27 d 周期变化有关，也不能排除与地磁活动的相关性；随后用多颗卫星的周期变率证实了 27 d 太阳辐射对大气密度的直接影响[2]。后续很多大气模型都按照线性规律描述大气密度与太阳辐射的关系，并从测量连续、工程可用性角度考虑，将射电辐射流量指数 $F_{10.7}$ 代替极紫外辐射作为模型输入，并取得较好的应用效果[3,4]。

人们也关注大气密度对太阳辐射变化的响应时间，早期 Romer[5]发现大气密度的变化滞后 $F_{10.7}$ 指数约 1.06 d；Eastes 等人[6]发现中午的大气密度滞后软 X 射线变化约 1.5 d；Guo 等人[7]分析 CHAMP 的资料后发现密度相对于射电辐射存在 1 d 左右的延迟。Ren 等人[8,9]基于物理大气模型的模拟发现大气密度峰值相对于极紫外 27 d 辐射的延迟时间约为 0.9 d，对大气温度的模拟显示延迟时间范围在 0.5~0.8 d 。

早期研究在资料空间和时间分辨率上存在一定局限，因此大气密度短期变化规律在细节上研究得不够清晰，例如，对不同高度、地方时和地理纬度的大气，辐射影响有无差异？不同辐射水平时，影响程度是否一致？为了回答这些问题，本文选择 CHAMP、GRACE-A 和 SWARM-C 等 3 颗卫星的高分辨率和全球纬度覆盖大气密度资料作为基础，再用极紫外辐射指数 S_{10} 和 SOHO 卫星 26~34 nm 极紫外波段测量值直接描述太阳辐射的 27 d 变化，用个例对比和多元回归分析等方法，研究大气密度响应在不同高度、纬度、昼夜半球和辐射水平等方面的细节特征和延迟时间。这些研究对于优化大气模型建模，修正大气密度具有借鉴意义，有助于提高近地空间目标和碎片的轨道预报精度，也能为高层大气变化物理机制研究提供观测证据。

2 数据和方法

2.1 太阳极紫外辐射的测量及其指数

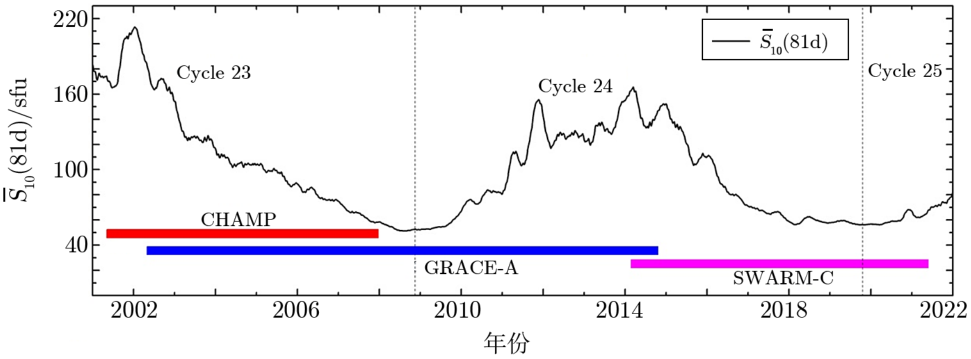
太阳发出的软 X 射线、极紫外辐射 (EUV) 在穿越地球热层大气时被吸收，对中性气体产生加热效应，提升大气密度和温度。然而，正因为它们被热层吸收，导致在地面上无法观测，需要去外层空间测量。早期研究缺乏空间卫星手段，只能用地面望远镜测量射电波段流量近似代替极紫外辐射水平[10]。1995 年 SOHO 卫星发射升空，搭载的“太阳极紫外监听器”(SEM) 开始了对极紫外辐射的常规连续观测。SpaceWX 处理了波长为 26~34 nm 的测量数据并归算成与射电辐射流量指数 $F_{10.7}$ 一致的计量单位 (sfu, 1 sfu=10^{-22} W·m^{-2}·Hz^{-2})，发布了极紫外辐射指数 S_{10}。该指数已被用于建立 Jacchia-Bowman 系列模型 (JB2006 和 JB2008)，通过与其他辐射波段的指数 ($F_{10.7}$, M_{10}, Y_{10}) 联合使用研究太阳辐射对大气密度的影响，取得了很好的效果[11,12]。S_{10} 指数的分辨率是 1 d，对于工程应用已经足够。然而，为研究大气密度对辐射变化的响应时间，还需要更高分辨率的极紫外辐射测量值，本文选择 SOHO 卫星 26~34 nm 波段测量值 1 h 分辨率的资料。

2.2 太阳辐射的 27 d 周期震荡

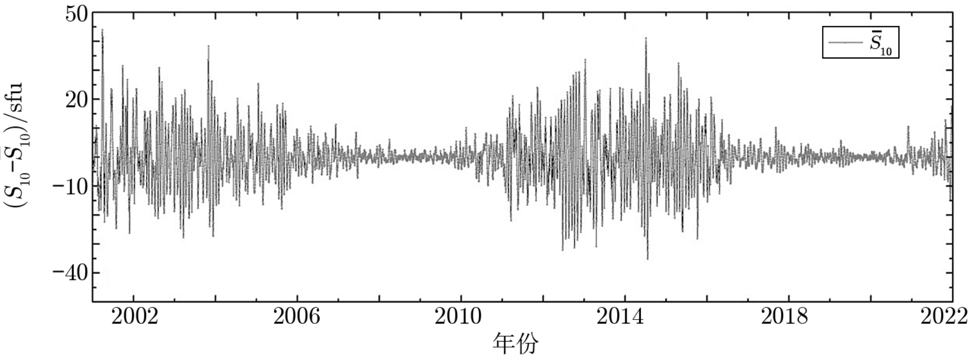
太阳存在 25~35 d 的自转 (赤道地区自转快，两极地区自转慢，即较差自转[13])，因此太阳表面的若干活动区时而朝向地球，时而侧向，时而背向，引起到达地球的辐射强度随之

起伏，变化周期与太阳自转以及活动区所在纬度有关。我们曾统计了 1960－2013 年太阳辐射在射电波段 ($F_{10.7}$ 指数) 的 27 d 震荡周期为 (27.18 ± 2.26) d[14]。用相同的方法对 1997－2022 年的极紫外辐射 (S_{10} 指数) 进行分析，统计得到震荡周期为 (26.85 ± 2.11) d，与之前的结果接近。

图 1 是用 S_{10} 指数描绘的 11 a 基本周期 (81 d 滑动均值) 和 27 d 短期变化 (日值减去 81 d 滑动均值)。从图 1 a) 可以清晰看到太阳的第 23、24、25 个基本周期；图 1 b) 表明 27 d 震荡最显著的区间都处于太阳活动峰年附近 (2001－2005 年，2011－2016 年)，在谷年时 (2008－2009 年，2019－2020 年) 震荡幅度很低。



a)



b)

图 1　资料覆盖时间范围内的太阳 11 a 长期变化和 27 d 短期震荡

图 2 是放大局部时间后的 SEM 测量值和 S_{10} 指数，a) 是强太阳活动期 2002 年 5 月至 2003 年 10 月，27 d 短期变化很清晰；b) 是弱太阳活动期 2019 年 1 月至 2020 年 6 月，虽然也能看到若干周期变化，但极度平静时 (2019 年 7 月至 12 月) 没有显著周期变化。将两段时间资料进行对比：a) 时间段的 SEM 均值是 b) 的 3.28 倍；SEM 标准差 (反映出样本周期变化的离散度) 在 a) 时间段是 b) 的 12.5 倍，可见太阳活动越强，27 d 短期震荡越显著。

2.3　热层大气密度数据

选择 CHAMP、GRACE-A 和 SWARM-C 共 3 颗卫星的加速仪测量资料反演得出的大

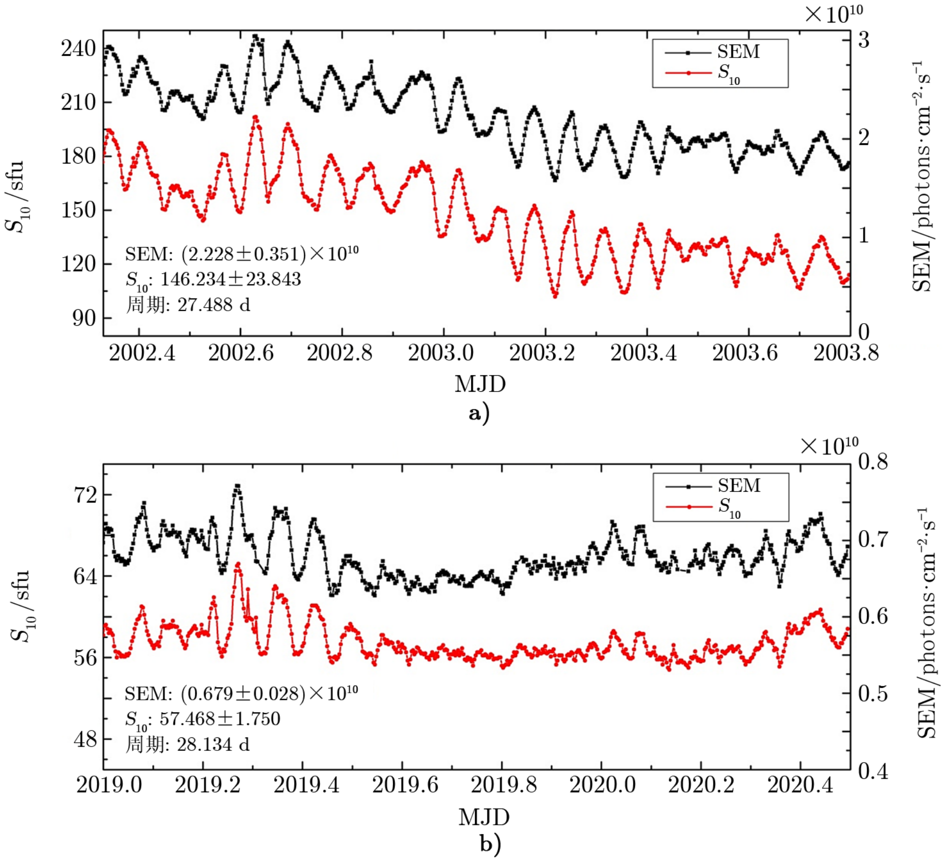


图 2　太阳活动峰年 (2002—2003 年) 和谷年 (2019—2020 年) 时 SOHO 卫星对 26~34 nm 极紫外辐射测量值和 S_{10} 指数

气密度值 (CHAMP 和 GRACE-A 的大气密度值由美国 Colorado 大学提供，SWARM-C 大气密度值由 ESA 任务数据中心发布)。资料时间范围如图 1 a) 所示，这 3 颗星资料总跨度是 2001－2021 年共 20 a，涵盖了 2 次太阳活动峰年，2 次谷年。CHAMP 和 GRACE-A 有接近 6 a 的时间重叠，GRACE-A 和 SWARM-C 有 11 月的时间重叠，可被用于多星资料的对比验证。相应的，CHAMP 高度在 350~450 km，GRACE-A 高度在 460~520 km，SWARM-C 高度在 480~550 km。

为凸显太阳辐射 27 d 震荡对大气密度的影响，应排除地磁显著扰动时的资料，选择依据是：资料时刻对应的日平均地磁指数 $A_{\rm p} < 20$，且前一天的最大地磁指数 $ap < 30$。此外，还需识别在资料时刻之前 4 d 内没有发生 3 h 指数 $ap > 94$ 的地磁暴事件。如果有，则资料很可能处在磁暴之后的恢复期，应被剔除。此外，偏心率引起轨道高度的周期变化，以及半长轴长期衰减均会引起大气密度变化，为避免这些信号掩盖太阳辐射的影响，需要对不同高度资料做归算处理，先计算研究区间内的轨道高度平均值，再利用式 (1) 将大气密度统一归

算到该平均高度 $\overline{Z}$ 上：

$$\rho(\overline{Z}) = \rho(Z) \cdot \frac{\rho_m(\overline{Z})}{\rho_m(Z)} \quad , \tag{1}$$

其中，$\rho(Z)$ 为高度 Z 处的实测密度，$\rho_m(Z)$ 和 $\rho_m(\overline{Z})$ 为用模型计算的两个高度 Z 和 $\overline{Z}$ 处的大气密度，$\rho(\overline{Z})$ 是实测密度值归算到 $\overline{Z}$ 处的密度值。ρ_m 选择 NRLMSISE00 模型进行计算。

2.4　提取大气密度与辐射短期变化的定量关系

主流模型一般把大气密度的变化区分为随太阳辐射的长期变化和短期变化两部分：长期变化用 81 d 平均射电辐射流量表征，短期变化用射电辐射流量日值减去 81 d 平均射电辐射流量刻画。本文按照相同的原理，建立大气密度的简化回归方程式 (即式 (2))，采用极紫外辐射指数 S_{10}，长期变化部分用 $\overline{S_{81}}$ 表征，短期变化用式中第二项 (日值减去滑动均值) 描述，本文重点关注这一项的偏相关系数 V_{27} 和斜率 B_{27}，式中第三项是地磁活动对大气密度的影响。

$$\rho = a_1\overline{S_{81}} + a_2(S_{\text{daily}} - \overline{S_{81}}) + a_3Kp + a_4 \quad . \tag{2}$$

对每一天的密度资料，先根据星下点地方恒星时区分成日照区和阴影区两组，再对南北纬 75° 之间的密度求日平均值，从而研究昼夜和高度差异；在研究纬度差异时进一步按照低纬度 (0°∼30°)、中纬度 (30°∼60°)、高纬度 (60°∼75°) 统计密度均值。

3　大气密度 27 d 短期变化规律

3.1　高度与昼夜差异

为展示 27 d 变化特征，先从大气密度和 S_{10} 指数时间序列中扣除长期趋势项 (81 d 滑动均值)，剩余量即为短期变化信号。以大气密度的时间序列为例，提取短期信号的方法是：记 ρ_d 为大气密度日均值，ρ_L 为 81 d 平均值所描述的长期变化，ρ_S 为周期约为 27 d 的短期变化，t 为计算日期，有：

$$\rho_L(t) = \sum_{t-40}^{t+40} \rho_d(t) \ , \ \ \rho_S(t) = \rho_d(t) - \rho_L(t) \quad . \tag{3}$$

对于日期 t，取其前后各 40 d (共计 81 d) 计算均值，随着 t 的变化，每一步都重新选取 81 d 窗口，即窗口随着计算时刻 t 滑动。由于是事后研究，辐射和密度数据都可获取。

图 3 a), c) 给出 CHAMP 和 GRACE-A 在 2004 年大气密度与辐射短期变化曲线，两者同步涨落且幅度一致；b), d) 给出两者之间相关系数和斜率，相关系数为 0.897 (CHAMP) 和 0.847 (GRACE-A)，呈现显著的线性相关。斜率的物理意义是 27 d 短期变化量每变化一个单位，引起大气密度的变化量，表征了大气密度受辐射影响的程度，CHAMP 为 0.051 5，GRACE-A 为 0.013 9，后者是前者的 27%。由于两颗星的资料在同一时间区间，但处于不同高度 (2004 年 CHAMP 高度均值 390 km，GRACE 为 489 km)，这意味着随着高度增加，辐射对密度影响程度会减小。

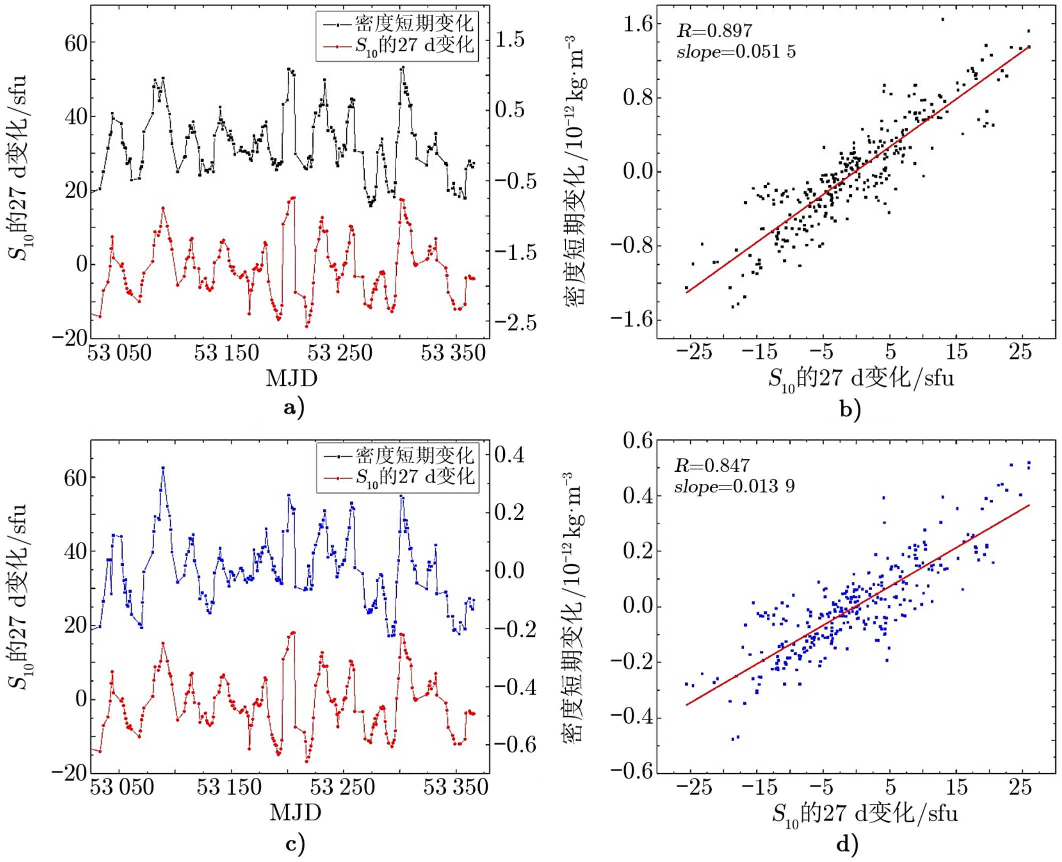


图 3　极紫外辐射 S_{10} 指数和日平均大气密度之间的关系 (2004 **年，日照区**)

用更长时间的资料，依托多元回归方程 (见式 (2)) 统计得到表 1，给出大气密度与辐射 27 d 短期变化的偏相关系数 V_{27} 和回归系数 B_{27} (意义等同于图 3 中的斜率)，无论在日照区或是阴影区，大气密度与 S_{10} 指数均存在显著相关 (V_{27} 超过 0.8)。对比 2014 年 SWARM-C 和 GRACE-A 的资料，同样证明了高度越高，斜率越小。

进一步对比表 1 中白天和夜间半球的结果，可以看出太阳辐射对密度影响存在昼夜差异：夜间密度与辐射的相关性依然显著，但在数值上 V_{27} 和 B_{27} 均比白天半球低，夜间的 B_{27} 只有白天的 46%~55%，意味着太阳辐射短期震荡对夜间大气密度的影响程度，约为白天的一半。这主要是因为白天半球直接受到辐射影响产生密度涨落，而夜间半球是间接受到来自白天半球能量和温度的传播。

表 1 中还给出了大气密度模型 NRLMSISE00 对应的模拟结果。(1) 从 B_{27} 看，模拟结果始终低于观测统计，表明模型低估了太阳辐射短期变化对密度的影响，以 2003－2004 年 CHAMP 的日照区资料为例，模拟斜率为 0.022 1，观测结果为 0.054 3，模拟仅为实测的 41%；(2) 从 B_{27} 的昼夜比值看，模型与实测基本一致，表明模型对昼夜差异的刻画是准确

表 1　相同时期不同高度卫星测量的大气密度和 S_{10} 指数相关性及模型模拟结果

			观测统计					模拟结果		
时间	卫星资料	高度 /km	日照区		阴影区		B_{27} N/D	日照区	阴影区	B_{27} N/D
			V_{27}	B_{27}	V_{27}	B_{27}		B_{27}	B_{27}	
2003－2004	CHAMP	400	0.924	0.054 3	0.890	0.029 7	55%	0.022 1	0.013 3	60%
	GRACE-A	490	0.876	0.014 7	0.811	0.006 8	46%	0.006 8	0.003 0	44%
	Diff.	90		27%		23%		31%	23%	
2014	GRACE-A	430	0.884	0.030 0	0.841	0.016 5	55%	0.018 1	0.010 4	57%
	SWARM-C	480	0.878	0.014 2	0.878	0.006 7	47%	0.010 0	0.004 9	49%
	Diff.	50		47%		41%		55%	47%	

注：表中 B_{27} N/D 表示用夜间斜率和日间斜率求比值，Diff 为两颗星之间结果的差异；对于高度 ALT 为绝对差值，对于斜率 B_{27} 为两颗星之间的比值，比值越小意味着差异越大；限于 NRLMSISE00 模型的固有算法，模拟中采用 $F_{10.7}$ 指数描述太阳辐射水平 (与 S_{10} 指数量纲一致)。模拟结果的相关系数 V_{27} 始终超过 0.99，这里不再列出。

的；(3) 对比不同高度的 B_{27}，在 2014 年模拟的比值 (55%, 47%) 普遍比观测 (47%, 41%) 高，意味着模型一定程度上低估了高度增加带来的斜率衰减。我们还用 DTM2000 模型进行了试算，结果与 NRLMSISE00 模型一致。

3.2　不同辐射水平时的差异

选择高度范围相同的两颗卫星做对比研究。表 2 第 1 组，选择 GRACE-A 卫星 2010 年 1 月至 2011 年 1 月的资料，S_{10} 均值为 77.966；选择 SWARM-C 卫星 2014 年 4 月至 2015 年 1 月的资料，S_{10} 均值为 142.616。这两段资料在相同高度范围，但 S_{10} 指数均值相差 65，对比可见：强太阳辐射水平时，偏相关系数 V_{27} 更大，斜率 B_{27} 是弱太阳辐射时的 1.760 倍 (白天半球)，意味着太阳活动剧烈时，27 d 短期震荡影响更显著。夜间半球的规律是一致的。对于第 2 组，SWARM-C 取为 2016 年 4 月－2017 年 3 月的资料，GRACE-A 取为 2012 年 5 月－2013 年 7 月的资料；两段资料高度均值相同，辐射均值相差约 50。同样证明：辐射水平越高，27 d 短期震荡的影响越大。

表 2 给出 NRLMSISE00 模型的模拟结果作为参照。(1) 从斜率 B_{27} 看，模拟斜率小于观测统计，以第一组 GRACE-A 的日间资料为例，模拟斜率 (0.004 1) 仅为观测结果 (0.008 4) 的 49%，与表 1 中结果一致，进一步确认模型低估了辐射短期变化对密度的影响；(2) 从斜率比值看，模拟结果显著高于观测统计，说明模型高估了由辐射水平引起的差异。

表 1 和表 2 只是针对个别时间区间内的资料作对比，分别揭示了“辐射相同、高度不同”，以及“高度相同、辐射不同”两种情形下的辐射影响差异。我们还对 3 颗星全部资料 (按时间连续分为 16 组) 统计得到斜率 B_{27}，并绘制 B_{27} 与资料所处的高度、辐射水平的关系。由图 4 可知：(1) 斜率随高度增大而衰减，呈负相关 (见图 4 a) 和 b))，且日间衰减速度是夜间的 1.85 倍；(2) 图 4 c), d) 仅包含了 GRACE-A 和 SWARM-C 的结果 (因为两颗星高度范围接近)，斜率随辐射增强而增大，呈正相关。综合可见，太阳辐射对大气密度的影响受到高度、昼夜和辐射水平的调节，首先由高度因素占主导，当高度范围接近时，辐射水平差异开始显现；同时，这两种因素的作用趋势在白天半球均比夜间半球显著。

表 2　相同时期不同高度卫星测量的大气密度和 S_{10} 指数相关性及模型模拟结果

按高度分组	卫星资料	S_{10} 均值	观察统计				模拟结果	
			日照区		阴影区		日照区	阴影区
			V_{27}	B_{27}	V_{27}	B_{27}	B_{27}	B_{27}
Group 1 Z = 477 km	GRACE-A	77.966	0.681	0.008 4	0.431	0.002 5	0.004 1	0.001 6
	SWARM-C	142.616	0.899	0.014 8	0.868	0.007 3	0.010 2	0.005 0
	Diff.	64.650		1.76		2.87	2.49	3.13
Group 2 Z = 458 km	SWARM-C	77.978	0.777	0.012 8	0.732	0.005 7	0.005 6	0.002 3
	GRACE-A	128.428	0.935	0.016 2	0.867	0.007 4	0.011 2	0.005 7
	Diff.	50.450		1.26		1.29	2.00	2.48

注：表中 Diff. 为两颗星/两组资料之间的差异，对于 S_{10} 均值指数为绝对差值，对于 B_{27} 为比值 (中/强辐射情形除以弱辐射情形)，比值越大意味着差异越大。模拟结果的相关系数 V_{27} 始终超过 0.99，这里不再列出。

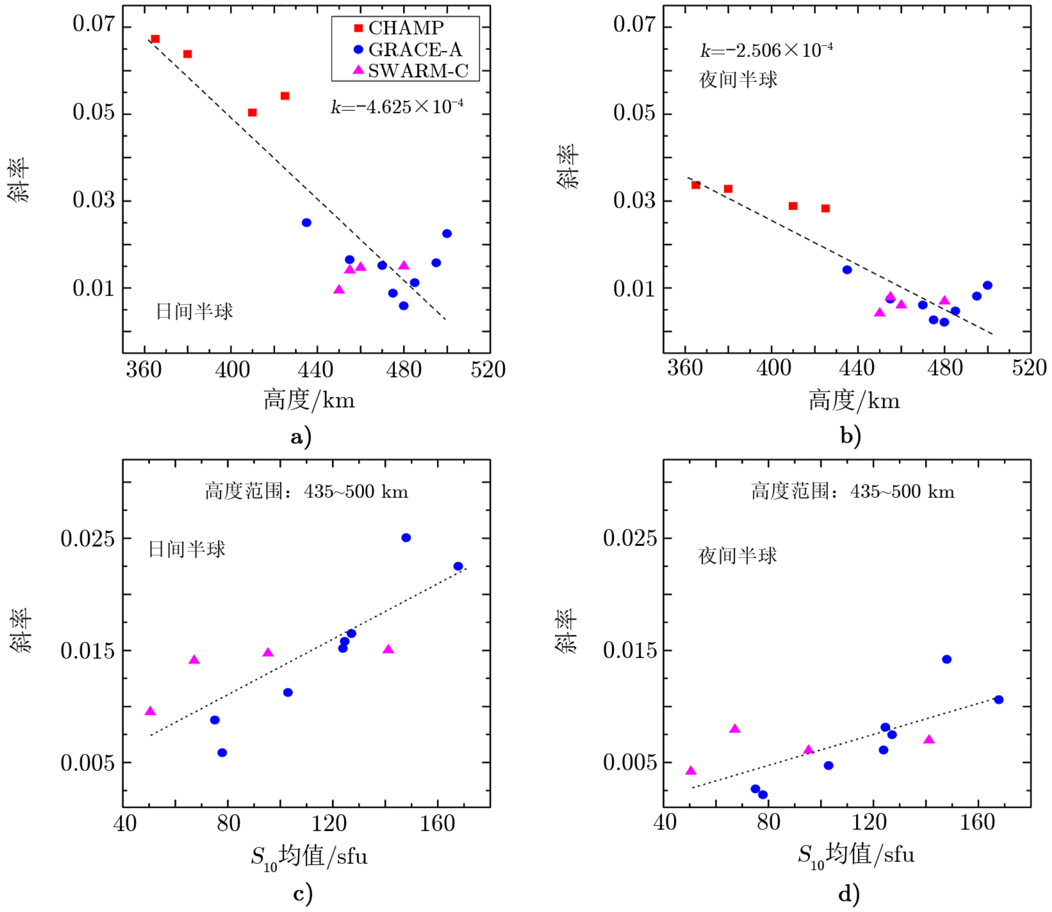


图 4　3 颗卫星 16 组资料分别统计得到斜率 B_{27} 随高度和辐射水平的变化规律

3.3　纬度差异

表 3 给出 4 组资料按照白天和夜间半球分别统计的 3 个纬度范围的 V_{27} 和 B_{27}。对比可发现：在日照区，斜率随着纬度增大而减小，低纬度区域是斜率最大值，高纬度区域斜率是低纬度的 80%~85%；在阴影区情形相反，斜率随着纬度增大而增大，高纬度区域是斜率最大值，高纬度是低纬度的 1.1~1.3 倍。

表 3　3 颗卫星不同纬度资料统计得到的 V_{27} 和 B_{27}

卫星资料和时间范围	纬度	日照区		阴影区	
		V_{27}	B_{27}	V_{27}	B_{27}
CHAMP 2003－2005	高纬	0.890	0.054 78	0.867	0.036 33
	中纬	0.894	0.064 14	0.861	0.034 07
	低纬	0.914	0.065 18	0.870	0.033 39
	高/低纬		0.840		1.088
GRACE-A 2003－2005	高纬	0.838	0.010 82	0.783	0.007 25
	中纬	0.849	0.012 48	0.782	0.005 57
	低纬	0.852	0.013 05	0.799	0.005 45
	高/低纬		0.829		1.330
GRACE 2011－2013	高纬	0.786	0.014 22	0.759	0.008 88
	中纬	0.807	0.016 85	0.730	0.007 95
	低纬	0.828	0.016 64	0.711	0.007 13
	高/低纬		0.855		1.245
SWARM-C 2014－2016	高纬	0.794	0.014 59	0.757	0.009 15
	中纬	0.801	0.017 04	0.772	0.008 02
	低纬	0.811	0.017 23	0.780	0.007 26
	高/低纬		0.847		1.260

4　大气密度对极紫外辐射的响应时间

选择 1 h 分辨率的 26~34 nm 极紫外测量值，再计算 3 个连续上升 (或下降) 轨道南北纬 75° 之间的平均大气密度，得到的密度时序资料分辨率为 3 h。再建立大气密度与辐射测量值和其他影响因素 (地磁、地方时等) 的多元回归方程，通过改变延迟时间的范围 (-72~24 h)，观察回归方程相关系数最大 (回归效果最优) 所对应的延迟时间，即为统计意义上的大气密度对太阳极紫外辐射的响应时间。

利用 1 h 分辨率的 SOHO 卫星 SEM 测量值，与 3 h 分辨率的大气平均密度 (临近 3 个轨道上升段或下降段求平均) 构建回归方程，见式 (4)。为凸显大气的密度短期变化，以 13 d 为一个计算窗口，因变量选择为大气密度的变化值 $\Delta\rho$。回归方程的自变量考虑 6 类：

(1) 极紫外辐射的短期变化量 ΔE_{EUV}；

(2) 地磁指数 Kp 的短期变化量 ΔKp；

(3) 地方时的变化量 ΔLT；

(4) 地方时 LT 的傅里叶函数形式；

(5) 计算窗口 $[t_i, t_i+13\ \mathrm{d}]$ 极紫外辐射均值 $\overline{E}_{\mathrm{EUV}}$；

(6) 计算窗口内平均轨道高度 $\overline{Z}$。

从各因素的作用原理上看，(1)－(3) 类属于在同一个 27 d 周期内，大气密度变化受到这些因素的直接影响；由于 3 颗卫星的极轨道特点，在计算窗口内地方时变化量 $\Delta LT_{i,j}$ 最大值小于 2 h，所以第三项 ΔLT 与 $\Delta\rho$ 的关系可近似为线性。(4)－(6) 类属于不同的 27 d 的周期之间影响大气密度变化的因素，密度随地方时 LT 的周日变化可以用 2 阶傅里叶函数表示，与 $\overline{Z}$ 的关系可以近似为线性关系。

$$\begin{aligned}\Delta\rho = &\ b_1\Delta E_{\mathrm{EUV}} + b_2\Delta Kp + b_3\Delta LT + b_4\cos(LT) + \\ &b_5\sin(LT) + b_6\cos(2LT) + b_7\sin(2LT) + b_8\overline{E}_{\mathrm{EUV}} + b_9\overline{Z} \quad .\end{aligned} \tag{4}$$

具体建立样本的方法如示意图 5，记 $t_{i,j}=t_i+j\ (j=7\sim13)$, t_{lag} 为计算 E_{EUV} 辐射值选取的延迟时间，$\overline{\rho}$ 为计算窗口内的平均大气密度，有：

$$\begin{cases}\Delta\rho_{i,j} = [\rho(t_{i,j})-\rho(t_i)]/\overline{\rho} \\ \Delta E_{\mathrm{EUV}(i,j)} = [E_{\mathrm{EUV}}(t_{i,j}+t_{\mathrm{lag}}) - E_{\mathrm{EUV}}(t_i+t_{\mathrm{lag}})]/\overline{E}_{\mathrm{EUV}} \\ \Delta Kp_{i,j} = Kp(t_{i,j}) - Kp(t_i) \\ \Delta LT_{i,j} = LT(t_{i,j}) - LT(t_i)\end{cases} \quad . \tag{5}$$

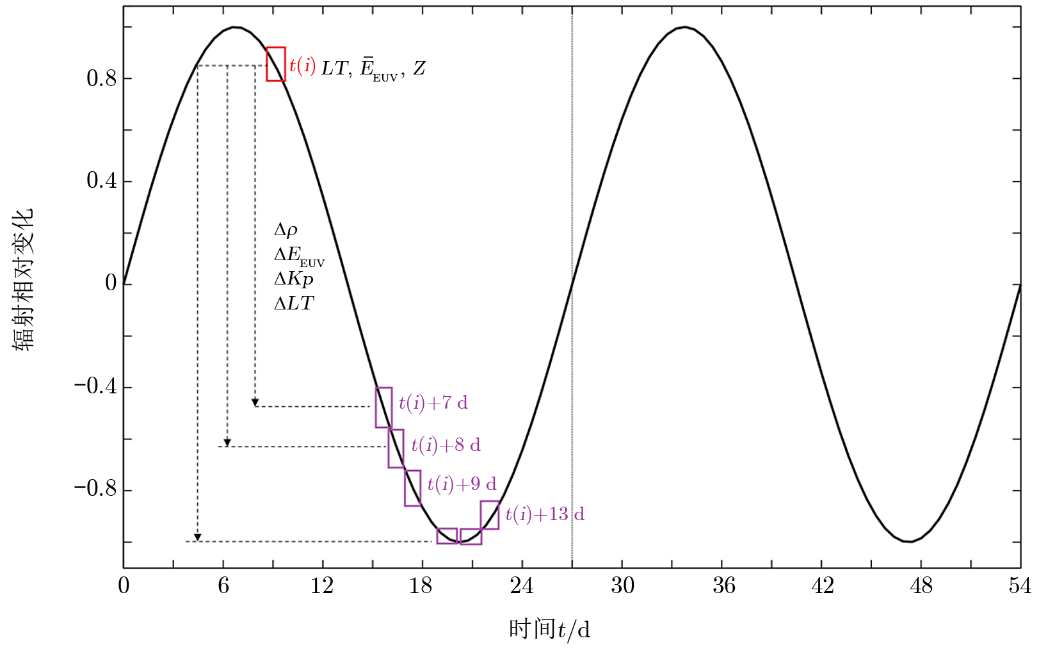


图 5 计算窗口内样本选择示意图

按照时间序列，将 t_i 之后的 13 d 作为一个窗口，用 $t_{i,j}$ 时刻的资料分别与 t_i 时刻资料对应求差。为凸显极紫外辐射变化 $\Delta E_{\mathrm{EUV}(i,j)}$ 的影响，还应尽量降低地磁扰动 $\Delta Kp_{i,j}$ 对密度的影响，所以剔除 $Kp(t_i) > 4$, $Kp(t_{i,j}) > 4$, $\Delta Kp_{i,j} > 2$ 的资料。计算 Kp 时选择资料时刻前 3 h 和 6 h 的地磁指数加权平均。通过滑动 t_i，可以得到大量的计算窗口，得到式 (4) 中参数估计所需的样本。

在 −72 h 和 24 h 之间以 6 h 为间隔选取不同 t_{lag}，寻求 $\Delta E_{\mathrm{EUV}(i,j)}$ 与 $\Delta\rho_{i,j}$ 最优的回归效果，判据是式 (5) 中 $\Delta E_{\mathrm{EUV}(i,j)}$ 的偏相关系数达到最大值，即为极紫外辐射作用最显著的情形，该时间可以看做是统计意义上大气密度对极紫外辐射的响应时间。需要指出的是：仅使用日照区的密度资料，因为阴影区大气并不直接受到太阳辐射作用，不适合研究密度延迟响应。

为保证资料的充分性，我们融合 3 颗卫星的资料对回归方程进行求解，大气密度变化量对极紫外变化量的偏相关系数如图 6 a) 和 c) 所示，横坐标是选择不同的延迟时间：图 6 a) 所示的是辐射上升阶段的情况，偏相关系数最大值出现在 −18 h，意味着用密度时刻之前 18 h 的极紫外辐射描述大气密度短期震荡，回归效果最好，最大相关系数为 0.897；图 6 c) 是辐射下降段情况，此时偏相关系数在 −30 h 达到峰值，但 −24 h 至 −36 h 都相对接近，峰值附近比较平坦。图 6 b) 和 d) 是选取上升段结果 −18 h，下降段结果 −30 h，计算大气密度变化量与极紫外变化量的散点图，可以看出清晰的线性规律。

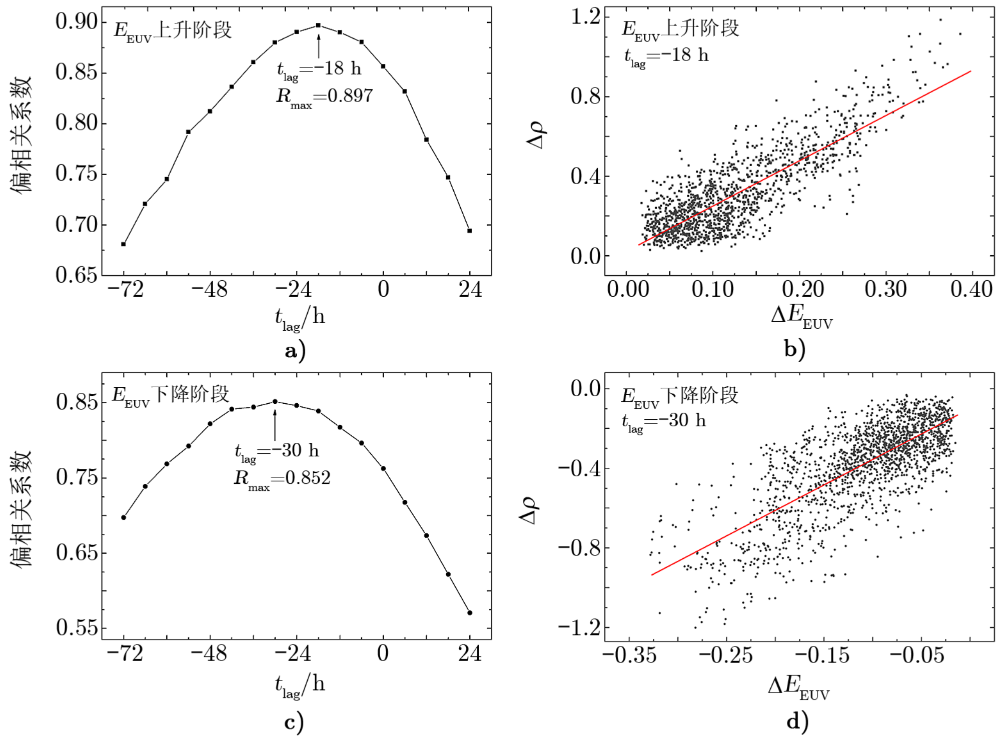


图 6　大气密度对极紫外辐射的响应延迟时间 (区分辐射上升段、下降段)

辐射下降段的回归效果略低于上升段，且延迟时间晚于上升段，是什么原因？我们认为，在辐射持续降低的过程，极紫外辐射输入减弱，作用下降，而凸显出地磁活动的影响相对增大，降低了辐射因素的信噪比，影响了延迟时间的估计 (回归效果变差，峰值附近变得平坦，延迟时间变得不确定)。Ren 等人曾指出地磁活动会显著影响延迟时间的计算，所以在物理大气模型 TIEGCM 模拟中将 Kp 设置为常数值 0，单独分析极紫外辐射对大气密度的影响[8]。我们认为辐射上升段资料求解出的延迟时间，更能真实反映大气对极紫外辐射的响应速度，因此可信的延迟时间为 18 h。

5 小结与讨论

本文选择 CHAMP、GRACE-A 和 SWARM-C 共 3 颗极轨卫星获得的大气密度资料，并从中提取大气密度的 27 d 短期变化信号，然后与太阳极紫外辐射 27 d 短期震荡时间序列进行相关性统计。相比过去的研究，本文使用的大气密度资料具有高时空分辨率和全球纬度覆盖的特点，使用的太阳辐射资料 (S_{10} 指数和 SEM 测量值) 是直接驱动大气密度变化的极紫外辐射。主要得出四条结论。

(1) 高度与辐射水平差异：太阳辐射 27 d 短期震荡对大气密度的影响，随着高度增加而减弱；随着辐射水平升高而增强；高度是主导因素，辐射水平次之。将观测结果与 NRLMSISE00 模型模拟结果对比，发现模型低估了太阳辐射短期变化对大气密度影响的 50%~60%，模型还低估了高度差异，高估了辐射水平差异。

(2) 昼夜差异：白天半球的大气密度受太阳辐射的影响程度高于夜间 (约 1 倍)；这是因为白天半球直接受到辐射作用，而夜间是受到辐射的间接影响。NRLMSISE00 模型对昼夜差异的模拟结果与实测基本一致。

(3) 纬度差异：白天半球低纬度区域受到辐射影响程度最大，随着纬度增大影响程度逐步降低；夜间半球的情形相反，夜间高纬度地区是受影响程度最大区域，往中低纬度区域影响程度逐步降低。考虑到能量在传播过程中会不断耗散，以上纬度差异可能预示着白天至夜间能量传播的路径是：先从白天中低纬度向高纬度传播，再到达夜间高纬度区域，随后向夜间低纬度传播，从而引起全球大气的整体涨落。

(4) 密度对辐射的响应时间：以白天半球为例，研究了大气密度相对于辐射短期变化的响应 (延迟) 时间，约为 18~30 h。考虑到处于辐射上升段的资料信噪比更强，因此从统计意义上确定延迟时间为 18 h。

将观测特征与模型模拟结果对比，表明现有模型的建模尚有不足。后续拟采用 Jacchia 和 DTM 模型框架作建模试验 (因为参数少)，从外层温度与辐射的线性关系式入手，对于短期变化项 (日值与 81 d 均值之差)，改变其单一系数形式，分别增加与高度因素和辐射 81 d 均值的耦合项，尝试不同的多项式组合，重新计算偏导数和模型系数，观察能否有效提取观测中的特征，积累数值试验可以优化建模。

致谢

感谢 NASA 和 ESA 联合实施的 SOHO 卫星计划提供了太阳极紫外测量载荷 SEM 的测量数据；感谢美国科罗拉多大学提供了基于 CHAMP 和 GRACE 卫星加速仪资料的大气密度数据 (https://lasp.colorado.edu/space-weather-portal)；感谢 ESA 提供 SWARM 卫星的数据 (http://www.esa.int/Swarm)。

参考文献：

[1] Jacchia L G, Briggs R E. SAO Special Report 18, Smithsonian Contributions to Astrophysics, 1963, 6: 13

[2] Jacchia L G. SAO special Report 29, Smithsonian Contributions to Astrophysics, 1963, 6: 55

[3] Bruinsma S G, Thuillierb F, Barlier F. JASTP, 2003, 65(9): 1053

[4] Picone J M, Hedin A E, Drob D P, et al. JGRA, 2002, 107(A12): 1468

[5] Roemer M. Bonn: Forschungsbericht Astronomische Institute, 1968: 29

[6] Eastes R, Bailey S, Bowman B, et al. GeoRL, 2004, 31(19): 804

[7] Guo J, Wan W, Forbes J M, et al. JGRA, 2007, 112: 308

[8] Ren D, Lei J, Wang W, et al. JGRA, 2021, 126: 8756

[9] Ren D, Lei J, Wang W, et al. JGRA, 2019, 124: 9184

[10] Wang H, Zhao C. ScChG, 2009, 52(7): 1120

[11] Bowman B R, Tobiska W K, Marcos F A. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, US: AIAA, 2006: 6166

[12] Bowman B R, Tobiska W K, Marcos F A, et al. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, US: AIAA, 2008: 6438

[13] 李林森. 天文与天体物理, 2013, 1: 45

[14] 汪宏波, 熊建宁, 赵长印. 天文学报, 2014, 55(4): 302

Thermospheric Mass Densities' Response to the Solar Radiation's Short-term Variation with 27-d Period

WANG Hong-bo[1,2], ZHANG Ming-jiang[1,2], XIONG Jian-ning[1,2]

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China)

Abstract: In the mission of orbit determination and prediction for space object and debris in low earth orbit, accurate mass densities and its short-term variation of thermospheric neutral gas are required. Solar radiation's short-term variation with 27-d period is an important space environment factor because it drives the global-scale fluctuation of thermospheric mass densities synchronously. This paper uses the neutral mass densities data derived from the

non-gravitational acceleration measurements by three polar-orbit satellites, such as CHAMP, GRACE-A and SWARM-C. The short-term variation of these densities was extracted and compared with the solar extreme ultraviolet (EUV) radiation, indicated as S_{10} index, to study the thermosphere response to radiation. Their differences at various height, radiation level, dayside/nightside hemisphere, and latitude were discussed. The multivariate regression analysis method was used to calculate the correlation coefficient and slope between the density and solar radiation. The results were as follows. (1) solar variation' effect on the density is negative correlation with altitude (major factor) and positive with solar activity level (minor factor). (2) the effect in dayside hemisphere is about 1 time stronger than that in the nightside. (3) the effect decreased as the rising of latitude in the dayside, while in the nightside the opposite is the case. It is implied that the direction of energy and temperature conduction in the dayside is from low equator region to high latitude, and in the nightside from high to low latitude. By comparing these observation results with the simulation used NRLMSISE00 model, it is indicated model underestimate the effect of solar radiation's short-term variation on densities for about 50%~60%, and its difference at various altitude, while overestimate the difference caused by average level of solar radiation. The response lag time of densities to solar radiation was studied by using EUV measurement with 1-h temporal resolution from SOHO project, indicating the lag time was about 18 h (0.75 d). These conclusions showed the complicate effect of solar radiation's short-term variation and were helpful to improving the modeling atmosphere density.

Key words: space weather; thermosphere mass density; solar extreme ultraviolet radiation; 27-d short-term variation